

## О НЕКОТОРЫХ ВОЗМОЖНОСТЯХ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ МЮОНОВ И НЕЙТРИНО

*И.М.Железных, Ю.С.Леонов*

Рассмотрены возможности глубоководных мюонных и нейтринных детекторов с использованием систем сбора черенковского света, стекловолоконных световодов и полупроводниковых фотоприемников.

1. В 1960 г. Марковым для детектирования нейтрино высоких энергий в космических лучах было предложено расположить аппаратуру, регистрирующую продукты нейтринных реакций по черенковскому излучению заряженных частиц, глубоко в океане или в подземном озере [1]. Еще раньше идея Маркова о проведении подземных нейтринных экспериментов развивалась в работах [2], где были выполнены первые оценки потоков атмосферных нейтрино и эффектов, вызываемых ими в грунте. Подобные оценки проведены также в [3]. Дополнительный анализ возможностей подземных нейтринных экспериментов [4 — 6] подтверждал их целесообразность, и несколько лет спустя атмосферные нейтрино были зарегистрированы [7]. Подземные (подводные) нейтринные эксперименты с детекторами больших масс могли бы оказаться важными не только для решения ряда фундаментальных проблем физики слабых взаимодействий, но и для получения астрофизической информации [1 — 4, 8], например, для детектирования потоков нейтрино высокой энергии, возникающих в оболочках сверхновых звезд [2, 4, 8].

В последние годы широко обсуждается проект создания глубоководного детектора мюонов и нейтрино с массой  $10^7 - 10^9$  т с фотоумножи-

телями (ФЭУ) в качестве регистрирующих черенковский свет элементов [9, 10] или даже большей массы при использовании акустического метода регистрации частиц с энергией выше, чем  $10^3$  Тэв [11]. Основная трудность реализации [10] состоит в том, что требуется  $> 3 \cdot 10^4$  ФЭУ с диаметром катода  $\sim 25$  см. Причем боксы с ФЭУ должны выдерживать давление в сотни атмосфер.

2. Между тем в последнее время достигнуты значительные успехи в изготовлении весьма чувствительных полупроводниковых фотоприемников (ПФП) по планарной кремниевой технологии. ПФП имеют высокую квантовую эффективность ( $> 40\%$ ) и способны регистрировать излучение  $\sim 10^{-12}$  вт/см<sup>2</sup> в оптическом диапазоне [12]. ПФП с такими параметрами, включая время интегрирования  $\sim 500$  нсек, можно зарегистрировать черенковское излучение на уровне  $N_k \sim 10$  квантов.

В глубоководных условиях преимущества ПФП перед ФЭУ очевидны: они способны выдержать высокие давления, и для их питания требуется энергия на много порядков меньше, чем для ФЭУ. Однако малая площадь чувствительных ПФП ( $\leq 3$  см<sup>2</sup>) выдвигает требование сбора квантов света либо зеркалами, либо специальными оптическими ловушками.

Рассмотрим некоторые возможности.

3. Регистрацию квантов света, испускаемых заряженными частицами в воде, можно производить ПФП, помещенными в фокус параболического зеркала и образующими плату-мозаику. Изображение на плате позволит определить направление прихода света и получить информацию о траектории частицы. Информация может быть передана на берег путем модуляции сигнала лазера, например ИАГ: Nd ( $\lambda = 1,06$  мкм), посылаемого с берега по стекловолокну с малыми потерями. Регистрирующий излучение модуль можно представить в виде сферической поверхности, составленной из ячеек — зеркал.

В описанной схеме в фокус зеркала будет попадать

$$N \approx \frac{2 \cdot 10^4 d^2}{\pi l} \exp\left(-\frac{l}{L}\right) \text{ квантов,}$$

где  $d$  — размер зеркала,  $l$  — расстояние от зеркала до точки испускания света,  $L$  — длина пробега света в воде,  $2 \cdot 10^4$  квантов/м — постоянная испускания черенковского излучения в воде в диапазоне 0,4 — 0,7 мкм. В чистой морской воде или воде озера Байкал  $L \sim 40$  м. При  $d = 1$  м,  $l = 40$  м,  $N \approx 10^2$  квантов, т. е.  $N \gg N_k$ . Если площадь ПФП платы позволяет принимать излучение каждым зеркалом под углами  $\pm 10^\circ$  от оси, то в модуле будет  $\sim 120$  зеркал. При  $l = 40$  м каждый модуль может осуществлять прием излучения из массы воды  $\sim 4\pi/3 l^3 \approx 2 \cdot 10^5$  т.

Сбор квазипараллельных пучков света с помощью зеркал особенно эффективен, если изучаются частицы, движущиеся в определенных направлениях. Это позволяет надеяться, что изучение мюонной физики (кривой поглощения, пучков мюонов и т. д.) на больших глубинах, которых мюоны достигают только при углах, близких к вертикальным, может осуществляться с помощью систем зеркал, настроенных на соответствующие углы.

4. Рассмотрим возможности сбора света с помощью так называемых световых ловушек. В качестве световых ловушек могут быть применены материалы из пластика или жидкости с люминесцирующими добавками [10], в которых часть изотропно переизлученного света с большей длиной волны захватывается из-за полного внутреннего отражения. Мы предлагаем использовать стекловолоконные нити с люминесцирующими добавками. Ловушку можно представлять в виде стеклянного ковра, концы нитей которого собираются вместе и подводятся к ПФП. Если считать, что в нити из изотропно излученного света захватывается  $\sim 0,1$  и учесть потери в стекловолокне, то на ПФП можно собрать  $\sim 0,03$  от света, падающего на световую ловушку — ковер. В этом случае при  $N_k = 10$  может быть зарегистрировано  $\sim 300$  квантов, падающих на ковер. Для эквивалентной замены ФЭУ диаметром 25 см в проекте [10] площадь ковра должна быть  $\sim 1 \text{ м}^2$ , а площадь ПФП несколько  $\text{см}^2$ . Отметим, что увеличивая площадь ловушки, можно значительно уменьшить общее число модулей детектора (здесь модулем назовем ловушку света + ПФП).

Можно также представить регистрирующий модуль, составленный из зеркал, в фокусе которых располагаются ковры из стекловолокна площадью  $\sim 0,1 \text{ м}^2$ . Нити же этих ковров сходятся к одному ПФП.

5. Возможно ли собирать достаточное количество квантов света в стекловолокне площадью  $\sim 1 \text{ мм}^2$ , чтобы затем транспортировать их к фотодетектору такой же площади? Для этого мы предлагаем использовать двойное переизлучение, когда свет, собранный ковром, направляется на стеклянную нить диаметром  $\sim 1 \text{ мм}$  и с люминесцирующими добавками, сдвигающими длину волны света в область еще больших длин волн, для которых потери в стекловолокне минимальны. Для оценки можно предполагать, что в нити собирается  $\sim 0,001$  от света, падающего на ковер площадью  $\sim 10 \text{ м}^2$ . Собранный таким образом свет можно транспортировать на значительные расстояния по стекловолокну к фотодетектору малой площади.

6. Дальнейшее увеличение чувствительности ПФП, например, на основе структур  $A_3B_3$  или SiC, и увеличение их площади позволит существенно уменьшить количество модулей в рассмотренных выше вариантах детекторов. Конечно, создание в будущем дешевых ПФП большой площади позволит создавать подводные детекторы мюонов и нейтрино без систем для сбора света. Не исключено однако, что окажутся перспективными и рассмотренные выше возможности. Во всяком случае они должны иметься в виду при обсуждении подводного детектирования мюонов и нейтрино.

Авторы выражают глубокую благодарность М.А.Маркову за полезные стимулирующие обсуждения затронутых в статье вопросов. Авторы также глубоко благодарны за полезные дискуссии Л.Г.Деденко, Е.М.Дианову, Г.С.Драгуну, Г.Т.Зацепину, В.А.Кузьмину, А.Е.Чудакову.

## Литература

- [1] М.А.Марков. Proc. X Int.Conf. High Energy Phys., Rochester, 1960, p.579.
  - [2] И.М.Железных. Дипломная работа, МГУ, 1958; И.М.Железных, М.А.Марков. Сб. "Физика нейтрино высоких энергий" Д-577, Дубна, 1960.
  - [3] К.Greisen. Proc. Int. Conf. Instr. High Energy Phys., Berkley, 1960, p.209.
  - [4] М.А.Марков, И.М.Железныkh. Nucl. Phys., 27, 385, 1961.
  - [5] Г.Т.Зацепин, В.А.Кузьмин. ЖЭТФ, 41, 1818, 1961.
  - [6] В.А.Кuzmin, М.А.Марков, Г.Т.Затseпин, И.М.Железныkh. J. Phys. Soc. Japan, 17, Suppl. A-III, 353, 1962.
  - [7] F.Reines, M.Crouch, T.Jenkins et al. Phys. Rev. Lett., 15, 429, 1965; G.V.Achar, M.G.K.Menon, V.S.Narasimham et al. Phys. Lett., 18, 196, 1965.
  - [8] В.С.Березинский, Г.Т.Зацепин. УФН, 122, 3, 1977.
  - [9] H.Blood, J.Learned, F.Reines, A.Roberts. Proc. Neutrino, 1976, Aachen, ed. H.Faissner, 1977.
  - [10] Proc. 1976 DUMAND Summer Workshop, Hawaii, ed. A. Roberts, 1977.
  - [11] Г.А.Аскарьян, Б.А.Долгошеин. Письма в ЖЭТФ, 25, 276, 1977; Т. Bowen, см. ссылку [10], стр. 523.
  - [12] Optical spectra, N6, 19, 1977.
-